

УДК 006.91:004.942

**В.М. ТОНКОНОГИЙ**, д-р техн. наук,  
**І.В. ПРОКОПОВИЧ**, д-р техн. наук,  
**М.О. ДУХАНІНА**,  
**В.В. ДОБРОВОЛЬСЬКА**, Одеса, Україна

## **МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕНОСУ В МАШИНОБУДІВНИХ ДЕТАЛЯХ ІЗ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ**

Важливим етапом виготовлення гетерогенних матеріалів із суттєвою різницею властивостей окремих компонентів, на якому закладається якість майбутніх виробів, є заповнення рідкою частиною суміші формообразуючої оснастки. Пряме вимірювання щільності виробів конче необхідне як в системах управління процесом заповнення, так і при технічному контролі. Запропоновано та практично реалізований смісний метод вимірювання щільності матеріалів подібного типу.

**Ключові слова:** гетерогенні матеріали, вимірювання щільності матеріалів

Важным этапом изготовления гетерогенных материалов с существенной разницей свойств отдельных компонентов, на котором закладывается качество будущих изделий, является заполнение жидкой частью смеси формообразующей оснастки. Прямое измерение плотности изделий крайне необходимо как в системах управления процессом заполнения, так и при техническом контроле. Предложен и практически реализован емкостный метод измерения плотности материалов подобного типа.

**Ключевые слова:** гетерогенные материалы, измерения плотности материалов

An important step in the manufacture of heterogeneous materials with a significant difference of properties of the individual components, which includes the quality of future products, is to fill the liquid part of the mix snap which forms form . Direct density measurement products are extremely necessary as in the management systems process for filling and inspection. Proposed and practically implemented by a capacitive method of measuring the density of materials of this type.

**Keywords:** heterogeneous materials, measuring the density of materials

### **Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науково- практичними завданнями**

Значна кількість продукції сучасних підприємств отримується затвердінням із рідкого (пластмаси) або псевдо рідкого (ливарні форми, бетонні вироби, синтегран) стану. Основним етапом таких технологій є заповнення формоутворюючої оснастки відповідною сумішшю. На цьому етапі створюється не тільки конфігурація та властивості майбутнього виробу, але й закладаються передумови майбутньої якості останнього: щільність, рівномірність розподілу компонентів, наявність або відсутність раковин і т.п., що потребує постійного моніторингу за плином заповнення.

Особливо актуальним виглядає такий моніторинг, коли в тілі виробу наявна будь-яка арматура: прутки, пластини, решітки, тощо. Адже вони встановлюються в оснастку до заливання і суттєво йому перешкоджають.

Контролювати процес заливання в цьому випадку особливо важко, особливо тоді, коли в якості, наприклад, залізобетонного виробу виступає великогабаритна опора ЛЕП, гребля ГЕС та інші, габарити яких сягають десятків та сотень метрів. В таких випадках руйнівний контроль готових виробів неприпустимий, а відповідальність за стан залізобетонної продукції дуже висока.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Після виготовлення арматури та її контролю подальший результат технологічного процесу залежить виключно від якості заповнення оснастки бетонною сумішшю та твердіння останньої. Найголовніший контролюємий параметр, від якого залежать, насамперед, механічні властивості опори, – щільність бетону в виробі [1, 2].

Проаналізуємо проблему на прикладі технологічного процесу виготовлення залізобетонних опор ЛЕП. Для початку такого аналізу достатньо подивитися, як виглядає готова арматура перед її укладанням в формоутворюючу оснастку (рис. 1).

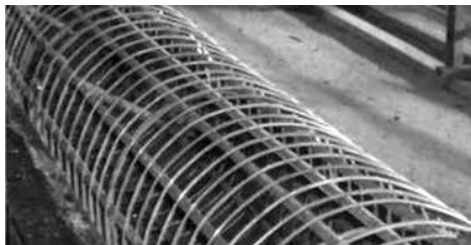


Рисунок 1 – Металева арматура перед заповненням бетонною сумішшю  
Зовнішній діаметр такої «клітки» дорівнює приблизно 0,7 м, а густина її решітки може стати на заваді заповнення оснастки бетоном, навіть з урахуванням додаткових до гравітації відцентрових сил

Безпосереднє вимірювання щільності під час обертання важко здійснювати навіть сучасними методами [3, 4]. Це пов'язано також із тим, що в початковій бетонній суміші присутня вода – електричний провідник, яка може суттєво і непередбачувано впливати на показання приладу, який вимірює електричні характеристики [5].

Найбільш перспективним на перший погляд виглядає ємнісний метод вимірювання, заснований на однозначній відповідності між щільністю матеріалу та його ємністю [6].

Для геометрично ідеальних випадків ємність плоского конденсатора може бути розрахована за формулою [7]:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{l}, \quad (1)$$

ємність циліндричного конденсатора:

$$C = 2\pi \varepsilon \varepsilon_0 \frac{L}{\ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)}, \quad (2)$$

ємність сферичного конденсатора:

$$C = 4\pi \varepsilon \varepsilon_0 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)^{-1}, \quad (3)$$

де:  $C$  – ємність конденсатора, Ф;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність;  $\varepsilon_0$  – електрична постійна,  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$ ;  $S$  – площа однієї обкладки,  $\text{м}^2$ ;  $l$  – відстань між обкладками, м;  $L$  – довжина циліндра, м;  $R_1, R_2$  – радіуси, відповідно внутрішній та зовнішній, м.

Для конкретного плоского конденсатора значення величини  $S$  і  $l$  суть постійні, і має місце однозначна залежність між ємністю і діелектричною проникністю простору між його обкладками. Якщо матеріал, що заповнює простір, неоднорідний і являє собою багатозфазну систему, то значення  $\varepsilon$  буде залежати від діелектричної проникності всіх фаз і процентного (масового) їх співвідношення [8].

Якщо в якості заповнювача проміжку між пластинами конденсатора розглядати бетон, сумарна діелектрична проникність останнього буде визначатися проникністю повітря пор і порожнин, зв'язуючого цементу, наповнювальних піску та гравію (тобто величинами постійними в межах даного експерименту) і співвідношенням мас перерахованих компонентів, тобто, в кінцевому підсумку, щільністю даної ділянки залізобетонного виробу.

### Мета роботи

Метою роботи є підвищення якості виробництва та зменшення відсотку бракованих виробів при виготовленні циліндричних залізобетонних центрифугованих стійок для опор високовольтних ліній електропередач шляхом розробки та впровадження метрологічного забезпечення для контролю щільності бетонної частини таких стійок електроємнісним

методом.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі: розроблені теоретичні основи ємнісного вимірювання щільності бетону в залізобетонних трубчастих конструкціях, створено стенд для вимірювання щільності бетону, розроблено систему контролю якості продукції, виконані практичні випробування результатів дослідження з позитивним техніко-економічним ефектом.

### Викладення основного матеріалу

#### **Розробка теоретичних основ ємнісного вимірювання щільності залізобетону трубчастих конструкцій.**

Систематичний виробничий контроль щільності бетонної частини залізобетонних виробів ускладнений через відсутність ефективних методів такого контролю без руйнування виробу. Нагадаємо, що довжина опор ЛЕП сягає 20 метрів при діаметрі 0,8 м!

Метод, запропонований в даній роботі, полягає у безпосередньому вимірюванні електричної ємності конденсатора, одна з обкладок якого є поверхня арматури виробу (див. рис. 1), а друга – поверхню рухомої частини стенду для вимірювання ємності. Такий підхід дозволяє забезпечити відносно стабільні геометричні параметри конденсатора і високу точність вимірювань.

Для тарування вимірювального приладу безпосередньо в розмірності щільності ( $\text{кг/м}^3$ ) для конкретних сумішей і конкретних умов вимірювання була виготовлена калібрувальна установка, яка складалася з конденсатора з параметрами:  $S = 0,01 \text{ м}^2$ ;  $l = 0,08 \text{ м}$ ; та вимірювача прецизійного LCR-821; діапазон вимірювання ємності:  $0,00001 \text{ пФ} - 99999 \text{ мкФ}$ .

Ємність такої установки складається з вхідної ємності вимірювального приладу  $C_{\text{вх}}$ , ємності сполучних проводів  $C_{\text{пр}}$  і власне ємності плоского каліброваного конденсатора  $C_{\text{к}}$ :

$$C_y = C_{\text{вх}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{к}}. \quad (4)$$

Значення  $C_{\text{вх}}$  і  $C_{\text{пр}}$  є постійними для конкретного дослідження і визначаються безпосереднім вимірюванням при відключеному конденсаторі. Перед проведенням обчислень величину  $C_{\text{вх}} + C_{\text{пр}}$  віднімали від вимірюваного значення  $C_y$ . В табл. 1 представлені значення щільності отриманих зразків і обчислені за формулою (4) ємності конденсатора, в якому при вимірюванні зразки виконували роль діелектрика.

Обробка отриманих даних з урахуванням конкретних розмірів калібрувального конденсатора дозволила отримати вираз для обчислювати середню щільність досліджуваного фрагмента бетону, якщо відома ємність конденсатора  $C$ , а також площа його обкладинок  $S$  та відстань між ними  $l$ .

$$d = 93 \cdot 10^{12} \text{ ClS}^{-1} - 774. \quad (5)$$

Достовірність формули підтверджується практичним збігом значень  $C$  для випадків розрахунку за формулою (5) при підстановці  $d = 0$ ,  $S = 0,01$ ;  $l = 0,02$ ; розрахунком за формулою (4) при підстановці діелектричної проникності повітря  $\epsilon_n = 1,00059$  і безпосереднім вимірюванням на калібрувальній установці при відсутності між обкладками зразка (табл. 2).

Оцінку похибки вимірювання за рахунок порушення конфігурації конденсатора здійснювали окремо за двома параметрами взаємного розташування обкладинок.

Відсоток помилки при неточності в установці відстані між обкладинками  $l$  на величину  $\Delta l$  визначали за формулою:

$$\frac{\Delta C}{C}(\%) = \frac{100\Delta l}{l + \Delta l}, \quad (6)$$

а відсоток помилки вимірювання від взаємної непаралельності обкладок за формулою:

Таблиця 1 – Залежність ємності конденсатора від щільності зразка

№№ зразка	Параметри зразка		Значення параметрів	
	$m$ , кг	$d$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_k \times 10^{12}$ , Ф	$\epsilon$
Повітря	-	-	2.21	1,00059
1	1,6224	2028	5.54	2,50831
2	1,6448	2056	5.57	2,52274
3	1,6584	2073	5.77	2,61410
4	1,6736	2092	5.83	2,64134
5	1,6808	2101	5.84	2,64535
6	1,7384	2173	5.9	2,67099
7	1,7552	2194	5.97	2,70465
8	1,7768	2221	6.00	2,71747
9	1,7968	2246	6.05	2,74071
10	1,8200	2275	6.06	2,74710
11	1,8344	2293	6.07	2,74873
12	1,8424	2303	6.11	2,76556
13	1,8664	2333	6.17	2,79360
14	1,9000	2375	6.21	2,81204
15	1,9184	2398	6.27	2,83768
16	1,9496	2437	6.33	2,86493
17	1,9712	2464	6.38	2,88656
18	1,9888	2486	6.43	2,90980
19	2,0136	2517	6.53	2,95548
20	2,0288	2536	6.68	3,02360

Таблиця 2 – Помилки вимірювання ємності різними методами

Визначення	За формулою (4)	За формулою (5)	Безпосереднє
Значення $C$ , Ф	$2.217 \cdot 10^{-12}$	$2.199 \cdot 10^{-12}$	$2.21 \cdot 10^{-12}$
% помилки	-	0.81	0.03

$$\frac{\Delta C}{C}(\%) = 100 \left( 1 - \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{l + x \operatorname{tg} \alpha} \right) = 100 \left( 1 - \frac{l \operatorname{ctg} \alpha}{r} \ln \frac{2l + r \operatorname{tg} \alpha}{2l - r \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (7)$$

де:  $r$  – розмір обкладки в площині перекосу;

$\alpha$  – кут між обкладками.

Розраховані за формулами (6) та (7) похибки при стандартних допусках на розмір  $H$  і кут  $\alpha$  навіть по шостого класу точності не перевищують 2 – 3%.

На жаль, конфігурація реальних обкладок в конденсаторі, створеному на тлі поверхонь внутрішньої арматури, дуже далека від площини, циліндру або сфери (див. рис. 1). Тому розглянемо обидві його обкладки як деякі криволінійні поверхні (рис. 2), описані функціями вигляду  $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$  та  $y_2(x_1^{k3}, x_2^{k4})$ , причому, жодна степінь при аргументах не дорівнює одиниці.

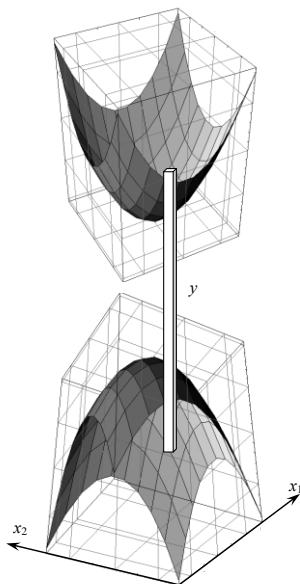


Рисунок 2 – Схема до розрахунку електричної ємності між двома криволінійними поверхнями

Хай поверхні  $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$  та  $y_2(x_1^{k3}, x_2^{k4})$ , ємність між якими обчислюється, описуються виразами:

$$\begin{cases} y_1 = x_1^2 + x_2^2; \\ y_2 = -x_1^2 - x_2^2 \end{cases} \quad (8)$$

при обмеженнях:

$$x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max}; \quad (9)$$

$$x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}. \quad (10)$$

Тоді ємність між цими поверхнями в межах (9) та (10) можна приблизно обчислити як суму ємностей окремих конденсаторів (паралелепіпед на рис. 3). Спрямовуючи розміри  $x_1$  та  $x_2$  цього паралелепіпеда до нуля, отримуємо за допомогою подвійного інтегрування:

$$\begin{aligned} C &= \varepsilon \varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{dx_1 dx_2}{|f_1(x_1 x_2) - f_2(x_1 x_2)|} = \varepsilon \varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2) - (-x_1^2 - x_2^2)} dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2)} dx_1 dx_2, \end{aligned} \quad (11)$$

виходячи з того, що останній подвійний інтеграл в (11) може бути обчислений за допомогою табличного [9, 10]:

$$\int \frac{du}{a^2 + u^2} = \frac{1}{a} \arctg \frac{u}{a} + c \quad (12)$$

**Розробка стенда для вимірювання щільності залізобетону.** На жаль, вираз (11), та ще й з врахуванням складностей, які впливають з його розв'язання за допомогою (12) та згаданої вище відмінності поверхні арматури від будь якої функції виду  $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$ , не може бути застосований для розрахунків залежності «ємність – щільність» на кшталт виразу (5) [11].

Тому в роботі було зроблено акцент на експериментальному виявленні меж ємності, які відповідають поняттю «якість». Для цього було розроблено стенд для вимірювання щільності бетону у великому залізобетонному виробі циліндричної форми (рис. 3).

Залізобетонна опора 1 розташовується на столі стенду. Вдовж опори співосно рухається пластмасове кільце 2, внутрішня поверхня якого вкрита шаром металу 3.

Арматура опори 4 і шар 3 утворюють між собою електричний

конденсатор, ємність якого вимірюється за допомогою приладу 6. В міру руху кільця 2 вздовж опори 1 прилад 6 запам'ятовує і виводить користувачеві залежність  $C(x)$  (див. рис. 3). Якщо крива  $C(x)$  знаходиться в межах між  $C_{\min}$  та  $C_{\max}$ , опора вважається такою, що позитивно пройшла випробування на щільність.

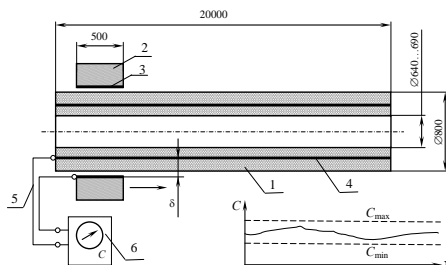


Рисунок 3 – Схема стенду для вимірювання щільності бетону у великому залізобетонному виробі циліндричної форми

### Висновки

В результаті аналізу залежності «ємність електричного конденсатора – щільність гетерогенного матеріалу між його обкладками» розроблені теоретичні основи ємнісного вимірювання щільності бетону в великих трубчастих залізобетонних конструкціях. Створено стенд для вимірювання щільності бетону в трубчастих залізобетонних конструкціях великого розміру (до 20 м) із рухомим вздовж такої конструкції електродом, між поверхнею якого та арматурою залізобетону утворюється вимірюваний конденсатор. Розроблено метод підвищення якості стійок циліндричних залізобетонних центрифугованих опор для високовольтних ліній електропередач у вигляді системи управління параметрами процесу їхнього виготовлення з використанням нових засобів вимірювання.

Пропоноване метрологічне забезпечення було використано при створенні системи управління технологічним процесом виготовлення виробу «Стійка циліндрична залізобетонна центрифугована для опор високовольтних ліній електропередач напругою 750 кВ». Практичні випробування цієї системи на ПАТ «Галенергобудпром» дозволили отримати наступні результати: середня вартість одного придатного виробу знизилася на 13 %, а кількість бракованих виробів знизилася на 23 %.

### Перспективи подальшого розвитку

Результати роботи підтверджують практичну можливість використання ємнісного методу вимірювання щільності окремих складових великих залізобетонних виробів.



Метод може бути застосований при управлінні технологічним процесом виготовлення таких виробів з оберненим зв'язком «по малому колу», коли вимірюються проміжні параметри процесу, а також «по великому колу», коли необхідні для управління дані отримуються на кінцевому етапі останнього.

**Список використаних джерел:** 1. *Снежков, Д.Ю.* Анализ методик неразрушающих испытаний бетонных конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / *Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович и др.* // Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 33-39. 2. *Улыбин, А. В.* Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1(27). – С. 4-13. 3. *Капожный, А.В.* Исследование методов контроля скрытых пустот различными способами // АСАУ, 2007. – № 10(30). – С. 54-62. 4. *Бербеков Ж.В.* Неразрушающие методы контроля прочности бетона // Молодой ученый. – 2012. – №11. – С. 20-23. 5. *Гольдштейн, А.Е.* Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля / *А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилов* // Ползуновский вестник. Раздел 4. Приборы и методы контроля. – 2013. – № 2. – С. 150-154. 6. *Становский, А.Л.* Неразрушающий метод измерения плотности фрагментов песчаных литейных форм / *А.Л. Становский, И.В. Прокопович и др.* // Збірник наукових праць. «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві». – Херсон, 2013 – Вип 4(5). – С. 104-110. 7. Измерение параметров конденсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://zpostbox.ru/izmerenie\\_parametrov\\_kondensatorov.html](http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.html)>. – 8.02.2017. 8. *Оборский, Г.А.* Выбор метрологического обеспечения управления сложными объектами литейного производства с трудноизмеримыми параметрами / *Г.А. Оборский, А. Л. Становский и др.* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2014. – № 6/3 (72). – С. 41-47. 9. *Бубняк, Т.І.* Вища математика. – Львів: Новий світ, 2009. – 436 с. 10. *Усов, А.В.* Дифференциальные и интегральные численны функции многих переменных / *А.В. Усов, В.М. Кузьмина та ін.* – Одеса: Астропринт, 2007. – 245 с. 11. *Прокопович, І.В.* Метрологічне забезпечення контролю щільності гетерогенних матеріалів / *І.В. Прокопович, М.О. Дуhanіна та ін.* // Вісник НТУ «ХПБ»: Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – № 50 (122). – С. 22-28.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Snezhkov, D.Ju.* Analiz metodik nerazrushajushhih ispytaniy betonnykh konstrukcij po dejstvujushhim gosudarstvennym standartam i normam Evrosojuza / *D.Ju. Snezhkov, S. N. Leonovich i dr.* // Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 2. – S. 33-39. 2. *Ulybin, A.V.* Metody kontrolja parametrov armirovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2012. – № 1(27). – S. 4-13. 3. *Kaluzhnyj, A.V.* Issledovanie metodov kontrolja skrytykh pustot razlichnymi sposobami // ASAU, 2007. – № 10(30). – S. 54-62. 4. *Berbekov Zh.V.* Nerazrushajushhie metody kontrolja prochnosti betona // Molodoy uchenyj. – 2012. – №11. – S. 20-23. 5. *Gol'dshtejn, A.E.* Ostrojka ot vlijaniya izmenenija jelektroprovodnosti vody na rezul'taty tehnologicheskogo kontrolja pogonnoj emkosti jelektricheskogo kabelja / *A. E. Gol'dshtejn, G.V. Vavilov* // Polzunovskij vestnik. Razdel 4. Pribory i metody kontrolja. – 2013. – № 2. – S. 150-154. 6. *Stanovskij, A.L.* Nerazrushajushhij metod izmerenija plotnosti fragmentov peschanykh litejnykh form / *A.L. Stanovskij, I.V. Prokopovich i dr.* // Zbirnik naukovih prac'. «Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi». – Herson, 2013 – Vip 4(5). – S. 104-110. 7. Izmerenie parametrov kondensatorov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <[http://zpostbox.ru/izmerenie\\_parametrov\\_kondensatorov.html](http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.html)>. – 8.02.2017. 8. *Oborskij, G.A.* Vyor metrologicheskogo obespechenija upravljenija slozhnymi ob'ektami litejnogo proizvodstva s trudnoizmerimymi parametrami / *G.A. Oborskij, A.L. Stanovskij i dr.* // Vostochno-evropejskij zhurnal передovykh tehnologij. Informacionnye tehnologii. – Har'kov, 2014. – № 6/3 (72). – S. 41-47. 9. *Bubnjak, T.I.* Vishha matematika. – L'viv: Novij svit, 2009. – 436 s. 10. *Usov, A.V.* Diferencijal'ne i integral'ne chislennja funkcij bagat'oh zminnih / *A. V. Usov, V. M. Kuz'mina ta in.* – Odesa: Astroprint, 2007. – 245 s. 11. *Prokopovich, I.V.* Metrologichne zabezpechennja kontrolju shhli'nosti geterogennih materialiv / *I.V. Prokopovich, M.O. Duhanina ta in.* // Visnik NTU «HPB»: Serija: «Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi». – 2016. – № 50 (122). – S. 22-28.